



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

책 장 넘기기의 탄성유체역학

Elastohydrodynamics of turning a page

2019년 8월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

명 지 혜

국 문 초 록

페이지를 넘기는 일상적인 활동은 독서뿐만 아니라 종이와 직물을 이용하는 제품 생산 과정에서도 찾아볼 수 있다. 우리는 책의 페이지를 넘기는 과정을 이해하기 위해 책의 종잇장을 얇은 탄성 시트로 간주하고, 시트가 변형되어 있다가 한쪽 끝이 놓여져 운동을 하게 되는 현상을 정적-동적 단계로 나누어 분석하였다. 우선, 정적 단계에서는 양쪽 경계가 지면에 대해 특정 각도를 가지고 특정 간격으로 clamped된 탄성 시트의 모양을 Euler Elastica를 사용하여 이론적으로 예측하였다. 동적 단계에서는 한쪽 경계의 clamped를 풀어주었을 때 버클링 되어있던 시트가 변형을 회복하면서 항력, 중력을 받아 좌우로 반복 운동을 하게 된다. 그리고 반복 운동의 중심축이 왼쪽이나 오른쪽으로 치우쳐지면서 시트가 어느 한쪽으로 넘어가게 되는 두 가지 flipping 현상을 확인할 수 있다. 본 연구에서는, 정적 단계에서 fixed end에 작용하는 모멘트들의 크기를 비교하여 시트가 최종적으로 넘어가는 방향을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 다양한 지오메트리와 재료의 탄성 시트를 이용한 실험으로 우리의 예측을 확인하였다. 추가로, 실제 책을 넘기는 활동에서도 flipping 양상을 결정하는 경계가 존재함을 실험결과를 적용하여 설명함으로써 종이를 집어 페이지를 넘기는 최적의 경로를 설명하였다. 본 연구 결과는 독자와 효율적인 제조 로봇을 위해 페이지를 넘기는 손가락의 최단 경로를 파악하는데 기여할 수 있다.

주요어: Elastica, Fluid-structure interaction

학 번: 2017-21022

목 차

국문초록	i
목차	iii
List of Figures	v
List of Tables	vii
기호설명	viii
1. 서론	1
2. 실험장치 및 실험방법	3
2.1 실험장치	3
2.2 실험방법	5
3. 이론적 모델링	10
3.1 Statics	10
3.2 Dynamics	14
4. 간소화 이론적 모델링	16
4.1 Flipping moment vs. Restoring moment	16
4.2 통합 모델 및 검증	20
5. 실생활 적용(practical implications)	24

6. 결론	26
부록	
A.1 Measuring material properties	27
참고문헌	30
Abstract (영문초록)	33

List of figures

Fig. 2.1	Schematic of experimental setup.	4
Fig. 2.2	Stroboscopic image of different flipping results according to free end position. Sheet is 20 cm PET. (a) flip with $X=0$, $Y=12$ cm (b) no-flip with $X=3$ cm, $Y=12$ cm	7
Fig. 2.3	Stroboscopic image of different flipping results according to clamping angle. Sheet is 20 cm PET. (a) flip with $\alpha=120^\circ$ (b) no-flip with $\alpha=60^\circ$	8
Fig. 3.1	Schematic diagram of the static system.	12
Fig. 3.2	Photograph of a sheet with different (a)free end position and (b)clamping angle, superimposed with the predicted shape. Red dash line is model and white solid line is experiments. Scale bar: 3 cm.	13
Fig. 3.3	Schematic diagram of the dynamic system and free body diagram of a unit element.	15
Fig. 4.1	Schematic diagram of simple model system.	17
Fig. 4.2	Plot of flipping moment vs. restoring moment. Blue symbols are flip and red symbols are no-flip.	18
Fig. 4.3	Experimental boundary slope, for 10 types of sheets. The dashed line is the linear fit to L/L_g with $R^2=0.9877$	22

Fig. 4.4	Plot of flipping moment due to gravity vs. restoring moment due to elasticity under consideration of properties of sheets. All experimental data with various free end position and clamping angle are contained. Different symbols correspond to different types of sheet (n=10).	23
Fig. 5.1	Changes of each region, X/Y according to clamping angle, bending modulus, and sheet length. (b) From top to bottom, changes in clamping angle according to the order in which books are read. Yellow bold lines represent transition boundary from no-flip to flip.	25
Fig. A.1	Measuring properties of PET. Blue solid line is a result of statics theory.	28
Fig. A.2	Measuring properties of PI. Blue solid line is a result of statics theory.	29

List of tables

Table 1	Properties of sheets in experiments (n=10)	9
Table 2	Legend of the plot	19

기 호 설 명

h	Sheet thickness
w	Sheet width
l	Sheet length
B	Bending modulus
E	Young's modulus
ν	Poisson ratio
ρ	Sheet density
g	Gravitational acceleration
θ	Local deflection angle of sheet with respect to the ground
(X, Y)	Free end position at released
α	Clamping angle of fixed end
ρ_a	Air density
C_D	Drag coefficient
\mathbf{r}_{cm}	Center of mass of buckled sheet
κ	Local curvature
M_g	Flipping moment due to gravity
M_0	Restoring moment due to elasticity
L_g	Gravito-bending characteristic length
m	Flip to no-flip regime boundary slope

1. 서론

유동이 탄성 구조체 주변을 지날 때 구조체의 움직임을 야기한다. 이 현상은 vortex-induced vibrations의 고전적 상황에서 발생한다[1]. 산업계에서는 건물 및 교량의 풍하중으로부터 안정성을 확보하는 것이 중요하게 여겨진다[2][3]. 이와 관련하여 생물학계에서도 동물의 비행[4][5]과 수영[6][7]의 동력학에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한, 고정된 탄성 구조체의 외곽을 통과하는 유동을 해석하기 위해서 수치해석 기법이 사용되기도 한다[8]. 같은 현상들에서 다른 연구진들은 유동에 초점을 맞추는 대신 안정된 풍하중을 받는 탄성 시트의 동적 형태 변화를 분석하는 데에 중점을 두기도 한다[9].

반면에, 탄성 구조체가 주변 흐름을 일으키는 현상도 많은 산업과 자연환경에서 관찰할 수 있다. 특히 생물학에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 일례로 동물의 보행이나 이동에서 추진력은 대체로 동물자신의 몸을 굽히는데서 얻어진다[10][11]. 수영은 헤엄치며 움직이는 동물의 몸과 이 움직임으로 유도된 주변 흐름 사이의 복잡한 상호 작용을 수반한다. 동물이 얼마나 빠르게 꼬리를 좌우로 움직이는지가 수영 속도와 동물 주변의 와동장(vorticity field)의 크기를 결정할 수 있다[12]. 또한 이러한 경우들에서도 주변의 유동보다는 동물의 몸, 즉 탄성 구조체에 초점을 둔 연구가 있다. 정적 환경에서 구조체에 저장된 탄성에너지가 운동에너지로 변환되면 구조체 주위에 유체의 흐름이 유도되고 구조체의 이동은 이 유동에 의해 항력(drag)을 받는다. 하나의 예로 Volvox와 같은 미생물은 이동을 위해 편모 또는 섬모를 사용한다고 알려져 있는데 여기서도 주변 유체에 의한 항력이 작용을 하여 이동을 방해한다[13]. 적혈구는 멤브레인을 끝에서

부터 돌돌 말아 버클링 시키는 탄성 릴리스라는 방식을 통해 내부의 낭충 (Merozoite, 娘蟲)을 방출시킨다. 적혈구는 점성이 있는 혈액내부에 존재하므로 탄성 릴리스로 인해 혈구가 점성 항력을 받아 앞으로 전진하는 현상이 발견된다.

그러나 주변 유동을 일으키면서 움직이는 탄성 구조체의 동적 변형은 이처럼 현미경을 통해서만 볼 수 있는 것이 아니라 육안으로도 쉽게 확인할 수 있다. 일상생활에서 흔히 접할 수 있는 책의 페이지 넘기는 상황을 떠올려 보면 우리는 한 페이지의 끝 부분을 잡고 반대쪽으로 이동시킨다. 구부러진 종이는 이동 중에 특정 위치에서 놓여지게 되고 곧바로 원형으로 회복을 하면서 항력을 받으며 운동하게 된다. 결과적으로 제자리로 돌아오거나 반대쪽으로 넘어간다. 본 연구에서는 두 개의 다른 결과가 종이 놓여지기 직전 어떤 형태로 변형되어있었느냐에 따라 결정된다는 것을 확인했다. 본 연구의 주안점은 정적 상태에서 종이에 작용하는 힘이 종이 놓여진 이후 이동방향 변화에 어떻게 기여하는지 확인해보는 것과 놓여진 종이 움직이는 경로를 예측하는 것이다. 이 시스템은 elastic beam 이론을 사용하여 설명될 수 있으며, 결과적으로 시스템을 설명하기 위한 간단한 모델이 개발하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

모든 실험은 주변 유동의 영향을 제거하기 위해 그리고 차후 이미지프로세싱을 위한 촬영에서 그림자의 영향을 제거를 위해 4면을 암막커튼으로 둘러싼 채 진행되었다. 폴리머 시트의 fixed end는 수동 회전 스테이지 (RSM-2, Nam II)에 고정되어 clamped angle, α 로 설정되고, free end는 선형 스테이지 (SLWZ40-L250, SLWX40-L250, Science Town)에 고정되어 위치 (X , Y)로 설정된다. 가시화를 돕고 torsion을 제외한 2 차원 동작만 고려하기 위해 형광 잉크로 각 시트의 가장자리를 칠했다. 암막부스 내에서 실험이 진행되기 때문에 정면에서 촬영을 하면 형광 잉크가 칠해진 시트의 단면만 찍히게 된다. Free end가 놓여지고 어느 한쪽으로 기울어 넘어가는 flipping 프로세스의 한 주기가 1 초 정도로 짧기 때문에 초고속 카메라 (Fastcam SA-Z, Fotron)를 이용해 250 fps로 촬영되었다. 실험 장치 구성은 Fig. 2.1에서 확인할 수 있다.

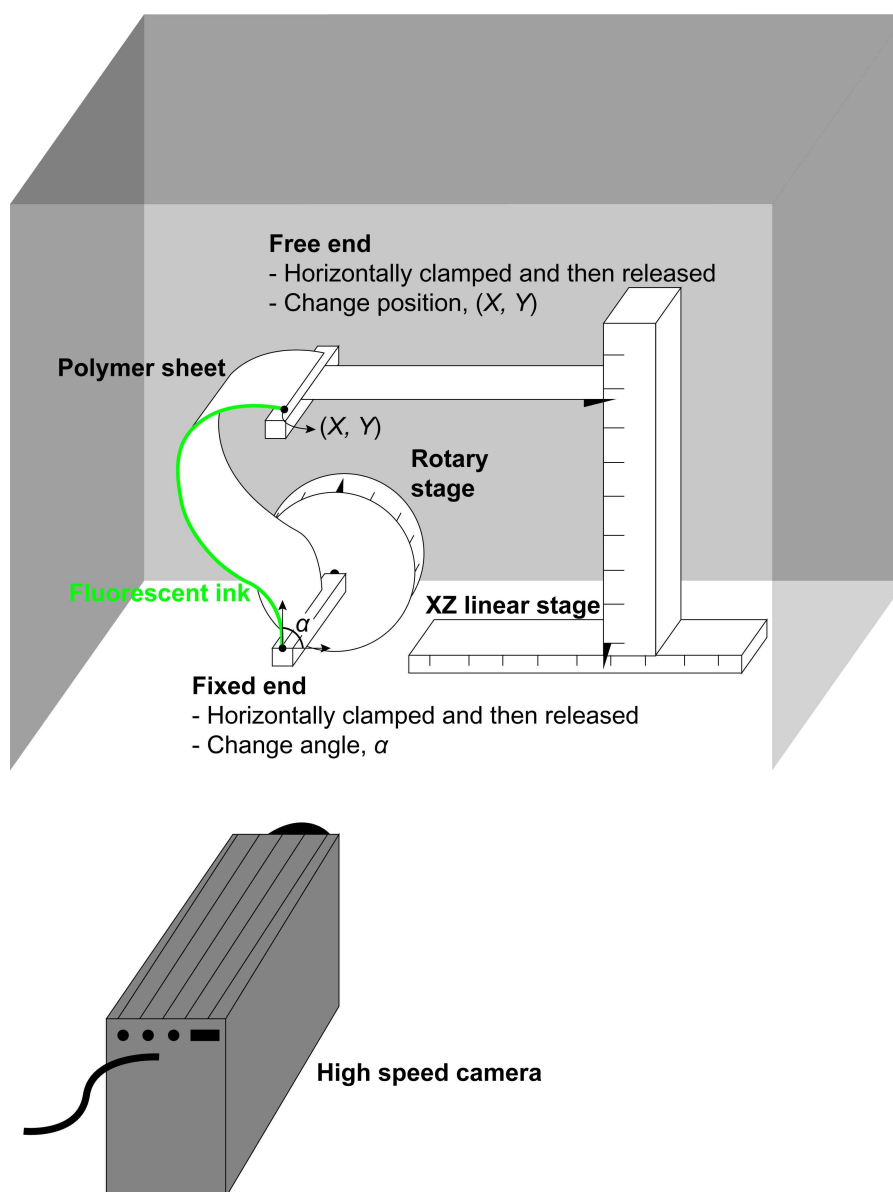


Fig. 2.1 Schematic of experimental setup.

2.2 실험 방법

책의 페이지는 양끝이 다른 경계 조건을 갖는다. 책의 제본 형태는 접착제로 접착하는 방법이 가장 흔히 사용되며, 비접착 방법으로는 실로 꿰매거나 스테이플러와 같은 철심을 박는 방법이 있다. 이 같은 방식으로 책에 묶여있는 페이지의 한쪽 끝은 clamped 경계 조건이며 그 위치를 기준으로 한다 - *fixed end*. 페이지를 넘기는 상황에서, 다른 쪽 끝은 두 손가락 사이에 집혀 위치가 변경되며 놓여진 후 clamped에서 free로 경계 조건이 전환된다 - *free end*. 실험은 위와 같은 경계 조건을 갖는 폴리머 시트가 책의 페이지와 동일하다는 가정에서부터 시작된다. 시트의 물성과 두께, 길이가 실험의 주요 변수이기 때문에, 3 종류 폴리머에 상이한 두께, 길이를 갖는 시트가 실험에 사용되었다 (Table 1).

사람이 책을 넘기는 과정은 펼쳐진 책의 오른쪽 페이지 free end를 집어서 왼쪽으로 이동시키는 것을 의미하는데, 여기서 반대쪽(왼쪽)으로 완전히 이동시키는 것이 아니라 스스로 움직여 가게끔 도중에 free end를 놓는다. 그리고 놓아야 할 위치는 모두가 경험적으로 알고 있다. 이 행동을 반영하기 위해, 폴리머 시트의 양쪽을 특정 위치와 각도로 클램프시켰다가 free end의 고정을 해제한다. 버클링 된 시트는 평면으로 펼쳐지기 위해 좌우 진동 운동을 시작하는데, 시트 진동의 진폭은 점차 감소하다 왼쪽 또는 오른쪽으로 기울어진다. 본 연구에서는 전자를 성공한 경우로 정의하여 'flip' 이라 하고, 후자를 실패한 경우로 정의하여 'no-flip' 이라 한다. 다른 결과를 초래하는 주요 변수는 사람이 free end를 놓는 위치와 fixed end의 고정 각도 (즉, 책이 바닥에 놓여져 있는 모양) 이다. 왜냐하면 해당 변수들이 탄성 시트의 경계 조건으로써 free end가 놓아지기 직전 변형 된 모양을 결정하며, 그 모양으로부터 flip 혹은 no-flip 결과가 결정되기 때문이다.

두 변수에 의해 달라지는 시트의 운동 경과는 Fig. 2.2와 Fig. 2.3에서 확인할 수 있다.

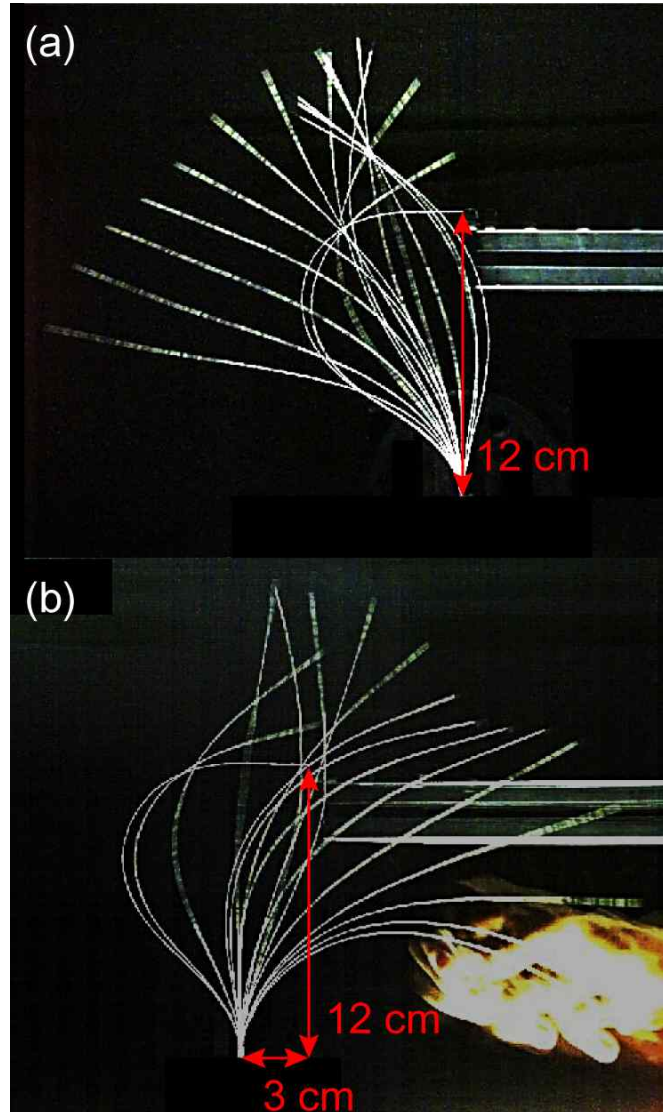


Fig. 2.2 Stroboscopic image of different flipping results according to free end position. Sheet is 20 cm PET. (a) flip with $X=0$, $Y=12$ cm (b) no-flip with $X=3$ cm, $Y=12$ cm.

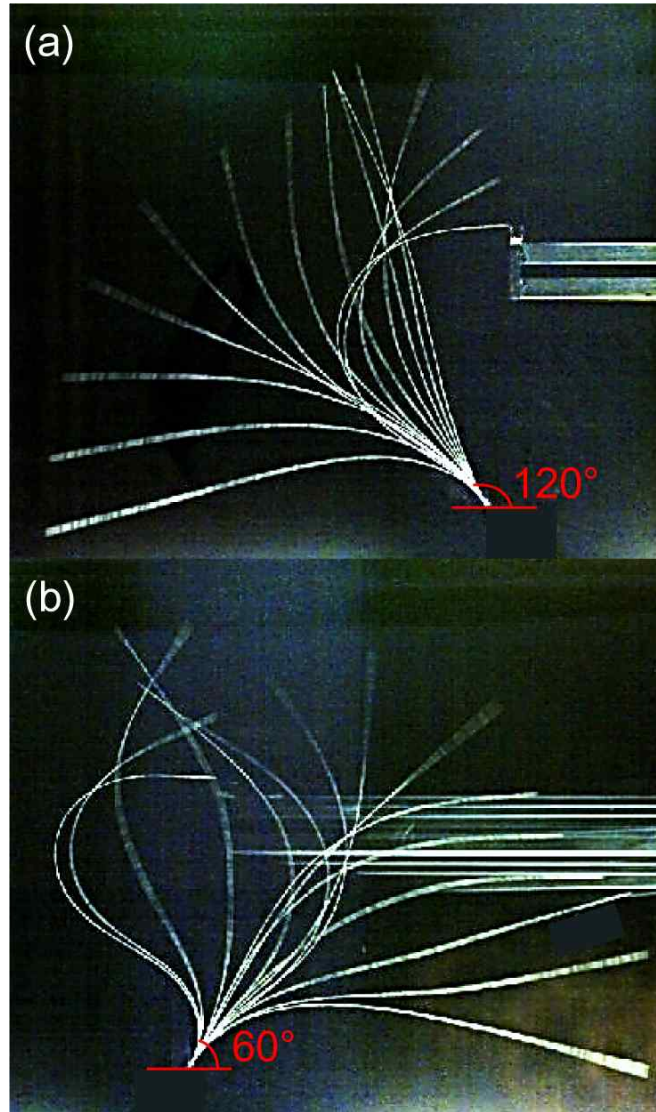


Fig. 2.3 Stroboscopic image of different flipping results according to clamping angle. Sheet is 20 cm PET. (a) flip with $\alpha=120^\circ$ (b) no-flip with $\alpha=60^\circ$.

Table 1 Properties of sheets in experiments (n=10)

	PET	Polyimide	Silicone rubber
Thickness [mm]	0.1	0.23	1.16
Density [kg/m ³]	1406	1402	1129
Young's modulus [GPa]	4	2.9	0.0033
Poisson ratio	0.44	0.4	0.49
Length [cm]	20, 21.5,		8,
	22.8, 25,	25	9.5,
	26.5, 28		11

3. 이론적 모델링

3.1 Statics

탄성 시트는 $\mathbf{x}(s,t)$ 로 표현될 수 있고, 그때의 unit tangent vector는 $\mathbf{x}_s = \mathbf{t} = (\cos\theta(s), \sin\theta(s))$ 이고 unit normal vector는 \mathbf{n} 이다(Fig. 3.1). 탄성 시트의 정적 형상은 고체재료의 역학 이론인 Euler Elastica를 통해 모델링 되었다[15]. 평형상태에서의 힘과 모멘트의 평형은 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{F}'(s) + \mathbf{K} = 0 \quad (3.1)$$

$$B\theta''(s) + \mathbf{t}(s) \times \mathbf{F}(s) = 0 \quad (3.2)$$

각 시트의 두께, 너비, 길이의 치수는 각각 $h \ll w \ll l$ 의 관계를 갖고 있다. 식(3.2)에서 B 는 시트의 bending modulus, $Enh^3/12(1-\nu^2)$ 를 의미하며, E 는 Young's modulus, 그리고 ν 는 Poisson ratio이다. 정적 상태에서 시트에 작용하는 외력은 오직 중력, $\mathbf{K} = -\rho hg \mathbf{e}_y$, 뿐이다. 따라서, 식(3.1)의 internal force, $\mathbf{F}(s)$ 는 $F_{s=0}^x \mathbf{e}_x + (F_{s=0}^y + \rho hgs) \mathbf{e}_x$ 으로 나타낼 수 있다. $\mathbf{F}(s)$ 를 식(3.2)에 대입해 정리하면 다음과 같다.

$$\theta''(s) = \frac{F_{s=0}^x}{B} \sin\theta(s) - \frac{F_{s=0}^y + \rho hgs}{B} \cos\theta(s) \quad (3.3)$$

식(3.3)을 통해 $\theta(s)$ 는 $s=0$ 부터 s 에서 수치적으로 계산될 수 있다. Shooting method로 $\theta'(s)$ 와 $\mathbf{F}(0)$ 값을 바꾸어 경계조건인 $\theta(l)=0$ 와

$\mathbf{x}(l)=0$ 를 맞추도록 했다. 그리고 $(\cos\theta(s), \sin\theta(s))$ 를 $s=0$ 부터 s 범위에
서 적분하여 $\mathbf{x}(s)$ 를 계산할 수 있다.

탄성 시트 양 끝의 경계 각도와 위치 정보를 가지고 식(3.1)과 (3.2)를 통
해 탄성 시트의 모양을 예측할 수 있다. 수치적 결과를 실제 실험결과와
비교해봄으로써 탄성 시트의 재료 물성치를 측정할 수도 있다. Fig. 3.2를
보면, 다양한 clamping angle과 free end의 위치 조건에서 모델을 통해 수
치적으로 계산한 모양과 실제 실험결과가 크게 유사함을 확인할 수 있다.

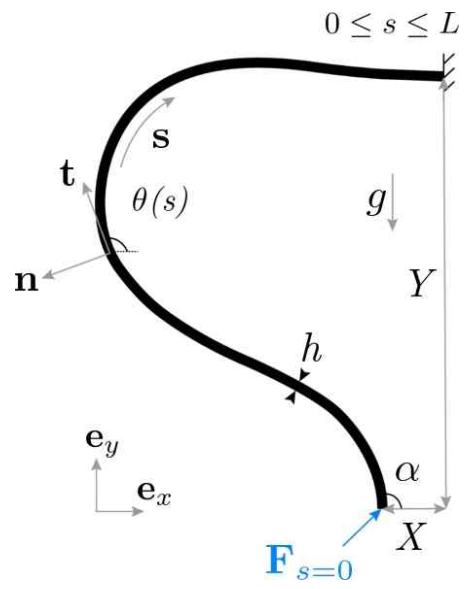


Fig. 3.1 Schematic diagram of the static system.

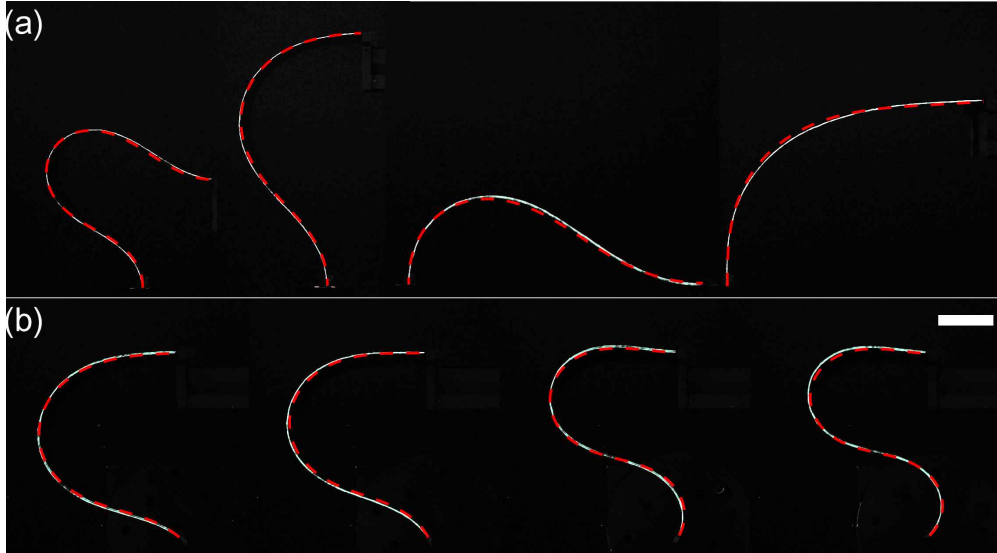


Fig. 3.2 Photograph of a sheet with different (a)free end position and (b)clamping angle, superimposed with the predicted shape. Red dash line is model and white solid line is experiments. Scale bar: 3 cm.

3.2 Dynamics

탄성 시트를 비신축성(inextensible) 탄성 빔으로 간주하여, 두께방향의 변형은 무시할 만큼 작다고 가정하고 xy평면상의 운동만을 모델링 한다. Dynamics는 식(3.1)과 (3.2)를 전체 시간에 대해서 확인하는 것으로 시간 미분 항이 추가되며, 비신축성 조건이 함께 고려되어야 한다.

$$\rho_s h \ddot{\mathbf{x}} = \frac{d\mathbf{F}}{ds} + \mathbf{K} \quad (3.4)$$

$$\frac{\rho_s h^3}{12} \ddot{\theta} = B \frac{d^2 \theta}{ds^2} + \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \quad (3.5)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{ds} = \dot{\theta} \mathbf{n} - \dot{\theta}^2 \mathbf{t} \quad (3.6)$$

식(3.4)에서 \mathbf{K} 는 항력, $-\frac{1}{2}\rho_a C_D \left| \frac{d\mathbf{x}}{dt} \cdot \mathbf{n} \right| \left(\frac{d\mathbf{x}}{dt} \cdot \mathbf{n} \right) \mathbf{n}$ 과 중력, $-\rho h g \mathbf{e}_y$ 으로 구성되는 외력을 의미한다. 모멘트 평형인 식(3.5)는 식(3.2)에서 회전관성력을 추가로 고려하는 것이다. 비신축성 조건식인 식(3.6)은 \mathbf{x} 와 θ 사이의 관계를 의미하며, unit tangent vector를 정의하는 기하학적 관계식인 $\mathbf{x}_s = \mathbf{t}$ 의 시간에 대한 미분으로부터 유도될 수 있다.

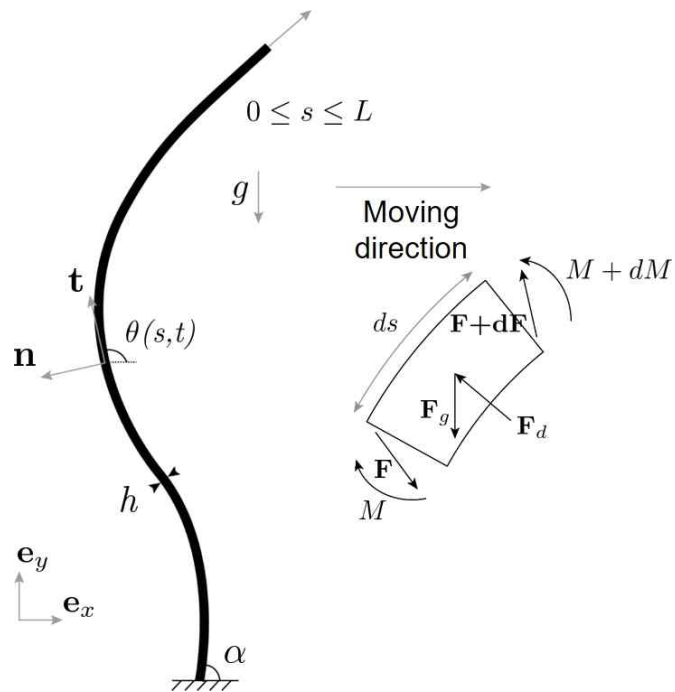


Fig. 3.3 Schematic diagram of the dynamic system and free body diagram of a unit element.

4. 간소화 이론적 모델링

4.1 Flipping moment vs. Restoring moment

앞서 방법대로, 전체 시간에 대해서 시트의 운동을 추적하지 않고도 flipping 조건을 간단하게 결정할 수 있는 방법을 알아보려고 한다. Fig. 4.1에서 정적 상태인 시트의 fixed end에 두 모멘트가 작용함을 확인할 수 있다. 중력에 의해 반시계방향으로 작용하는 모멘트, M_g 와 탄성력에 의해 시계방향으로 작용하는 모멘트, M_0 이다. 각각 시트의 flipping을 돕는 그리고 방해하는 역할을 하므로 flipping moment와 restoring moment라 한다. 모멘트는 아래의 식으로 계산될 수 있다.

$$M_g = \mathbf{r}_{cm} \times -\rho h L g \mathbf{e}_y \quad (4.1)$$

$$M_0 = B\kappa(0) \mathbf{e}_z \quad (4.2)$$

여기서 버클링 된 시트의 fixed end에 대한 무게중심, \mathbf{r}_{cm} 과 fixed end의 곡률, $\kappa(0)$ 은 statics 모델로부터 계산된다.

Fixed end에 작용하는 두 모멘트의 크기를 비교하여 flip과 no-flip경우를 포함하는 두 영역이 특정 경계를 기준으로 나뉜다. Fig. 4.2은 세 가지 종류의 시트의 경계 기울기 값이 서로 다른 것을 보여준다. 따라서, 모든 종류의 시트에 적용될 수 있는 통합 모델을 위해서는 시트의 특징도 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

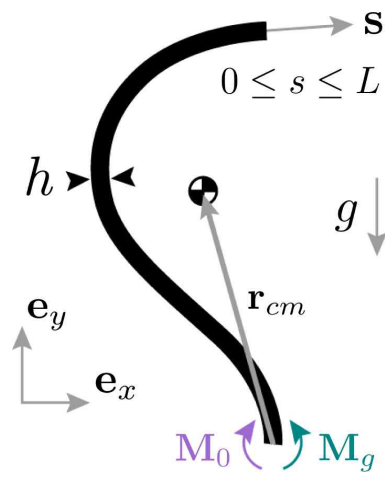


Fig. 4.1 Schematic diagram of simple model system.

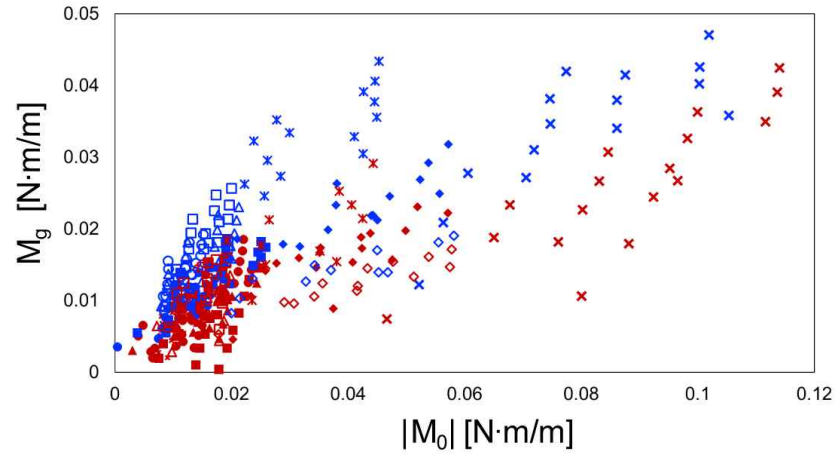


Fig. 4.2 Plot of flipping moment vs. restoring moment. Blue symbols are flip and red symbols are no-flip.

Table 2 Legend of the plot

Symbol	Material	L	L/L _g
◊	Silicone rubber	8 cm	2.3
×	PI (Polyimide)	25 cm	2.4
◆	Silicone rubber	9.5 cm	2.7
●	PET	20 cm	2.8
▲	PET	21.5 cm	3.0
✕	Silicone rubber	11 cm	3.1
■	PET	22.8 cm	3.2
○	PET	25 cm	3.5
△	PET	26.5 cm	3.7
□	PET	28 cm	3.9

4.2 통합 모델 및 검증

Bending energy, B/L 와 gravitational energy, ρhgL^2 의 균형으로부터 gravito-bending 특성 길이인 $L_g = (B/\rho hg)^{1/3}$ 을 구할 수 있다. 시트의 길이, L 과 L_g 를 비교하는 것으로 변형량을 추정할 수 있는데, L/L_g 가 1보다 클수록 변형이 크다는 것을 의미한다. L/L_g 는 bending modulus, 밀도, 길이와 같이 독립적인 값들로 나타낼 수 있는 무차원수이다.

Flip과 no-flip의 경계 기울기 값이 시트의 물성치에 의해 결정된다. 가정하고, 기울기 값과 물성치의 관계가 실험적으로 추정되었다. 실험은 시트가 충분한 시간동안 진동하다가 어느 한쪽으로 기울어질 수 있는 L/L_g 값의 범위 내에서 진행되었다. L/L_g 가 너무 작으면 시트가 뺏뺏하여 기울어지지 않으며, 너무 크면 시트가 flip할 만큼 충분한 변형 에너지를 가지지 않아 clamped에서 놓여진 이후 진동하지 않고 바로 바닥으로 내려앉기 때문이다.

Fig. 4.3는 서로 다른 시트의 종류에 대해서 flip과 no-flip 경계 기울기 값, m 과 L/L_g 을 피팅한 결과로 다음의 관계식을 만족한다.

$$m = 0.387L/L_g - 0.5396 \quad (4.3)$$

따라서, m 과 L/L_g 가 선형관계에 있음을 확인할 수 있으며 추정한 선형 관계식의 R^2 는 0.9877이다.

Fig. 4.4은 시트의 물성치에 따른 특징으로 표현된 m 을 포함하여 flipping moment와 restoring moment의 크기를 비교한 결과이다. 빨간색 기호는 no-flip을 그리고 파란색 기호는 flip을 의미한다. 모든 실험 결과를 종합한

것으로 시트의 종류에 관계없이 flip과 no-flip 영역이 명확히 분류되는 것을 확인할 수 있다. 이는 flipping moment와 restoring moment의 크기를 비교해 flipping 조건을 결정하는 방법에서 시트의 재료 물성치가 고려되어야 한다는 가정을 뒷받침한다. 버클링 된 시트가 놓여진 이후에 어느 방향으로 넘어갈지의 여부는 정적 상태에서부터 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 예를 들어, $M_g > (0.387L/L_g - 0.5396)M_0$ 이면 왼쪽으로 넘어가 flip할 수 있음을 예측할 수 있고, $M_g < (0.387L/L_g - 0.5396)M_0$ 이면 그 반대인 것이다.

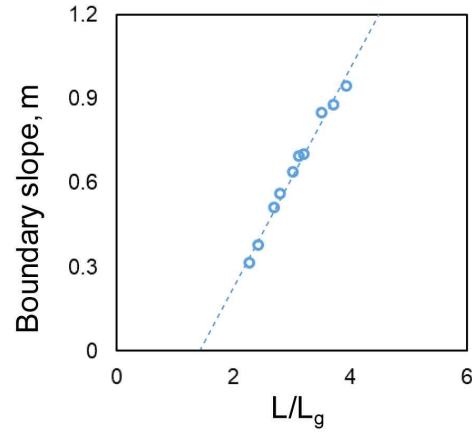


Fig. 4.3 Experimental boundary slope, for 10 types of sheets. The dashed line is the linear fit to L/L_g with $R^2=0.9877$.

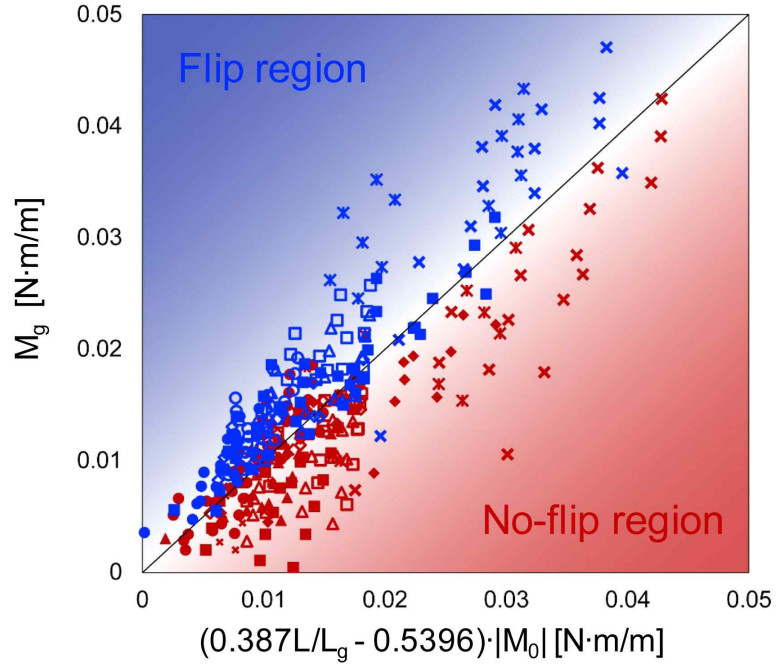


Fig. 4.4 Plot of flipping moment due to gravity vs. restoring moment due to elasticity under consideration of properties of sheets. All experimental data with various free end position and clamping angle are contained. Different symbols correspond to different types of sheet (n=10).

5. 실생활 적용 (Practical implications)

실험 결과를 실제 책 넘기는 상황에 접목해 해석함으로써 책을 넘기는 행동의 최적 경로를 제시할 수 있다. Flip과 no-flip 경우를 구분하는 그래프를 현실공간상에서 해석하는 것이다. 실험 결과에서 flip과 no-flip의 영역이 선형 경계로 분리된다는 것을 확인할 수 있었고, 이는 현실공간에서도 두 영역을 구별하는 경계가 존재할 수 있음을 의미한다. (X, Y) 는 버클링된 시트의 free end가 놓여지는 순간의 위치이고 그 결과로 flip에 성공 혹은 실패하는지를 X/Y 값으로 나타내었다(Fig. 5.1(a)).

페이지를 넘기는 것은 펼쳐진 책에서 오른쪽의 종이가 왼쪽으로 옮겨지는 것으로 정의했다. 이 과정에서 오른쪽에 펼쳐진 종이의 free end의 Y 는 0 이므로 X/Y 는 양의 무한대에서 시작해 감소하기 시작해 음의 무한대로 수렴하는 것이다. Fig. 5.1(b)은 X/Y 는 점점 감소하다가 flip영역으로의 전이 경계에 도달하고부터 free end가 놓여진 이후 왼쪽으로 계속 진행해 나갈 수 있는 것을 의미한다.

Fig. 5.1(a)는 X/Y 로 표현된 flip과 no-flip영역이 시트의 clamping angle, bending modulus, 길이에 따라 어떻게 달라지는지를 보여준다. 우리가 책을 읽어나갈수록 clamping angle은 증가한다(Fig. 5.1(b)). 이와 동시에 no-flip 영역 대비 flip 영역이 넓어지므로, free end를 전이 경계까지 이동시켜야 하는 거리가 짧아져 책 넘기기가 쉬워짐을 의미한다. 시트 길이에 대해서는 동일한 경향과 bending modulus에 대해서는 반대의 경향이 나타난다. 간단하게, 시트가 길어지거나 책의 페이지가 넓어지면 책 넘기기가 쉬워지고, 시트가 뾰뚱해지면 책 넘기기가 어려워진다.

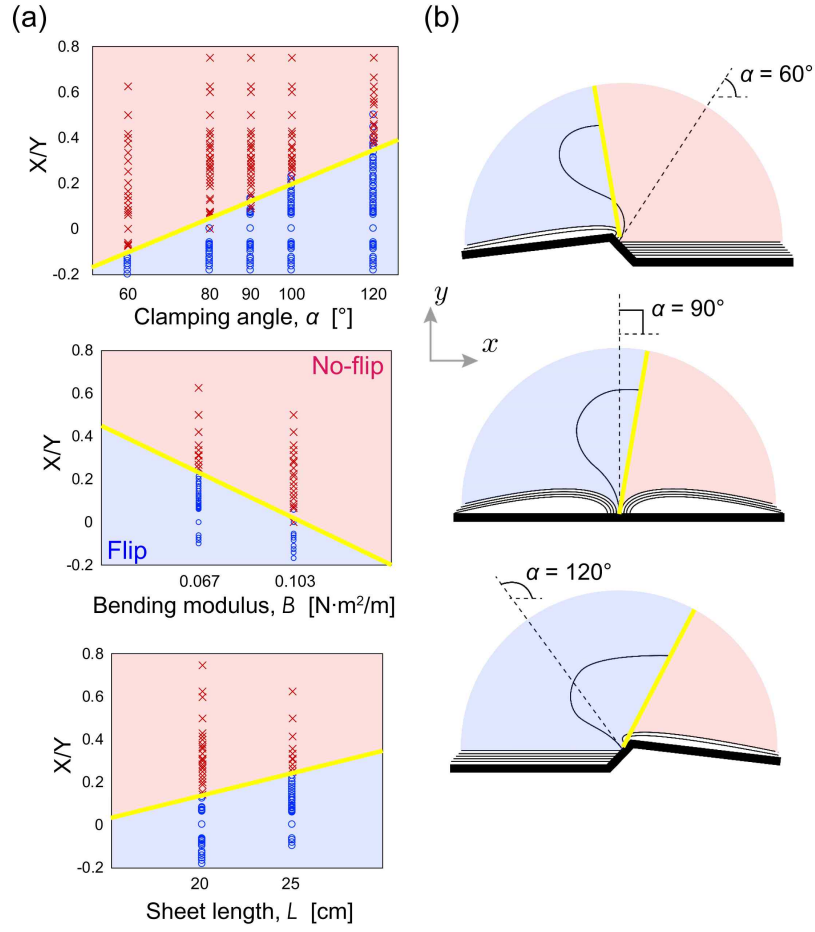


Fig. 5.1 (a) Changes of each region, X/Y according to clamping angle, bending modulus, and sheet length. (b) From top to bottom, changes in clamping angle according to the order in which books are read. Yellow bold lines represent transition boundary from no-flip to flip.

6. 결론

본 연구는 일상에서 흔히 접할 수 있는 책 넘기는 동작을 탄성유체역학을 통해 해석하는 것을 목적으로 한다. Fluid-structure interaction의 한 갈래로 유연한 구조체의 운동을 예측하는 연구가 진행되었다. Euler Elastica를 이용해 경계 조건이 주어진 정적 상태 시트의 모양을 계산하고 실험 사진과 비교하여 타당성을 검증하였다. 한쪽 경계의 고정이 풀리면 버클링되어 있던 시트가 변형 에너지를 변환하며 운동하게 되는데, 이때의 운동을 예측할 수 있는 dynamics 모델을 수립하였다. 향후 수치 해법으로 동적 시뮬레이션을 완성하여 모델을 검증하는 과정이 필요하다. 이보다 간단하게 책 넘기기 조건을 판단하기 위해, 시트의 fixed end에 작용하는 반대방향의 두 모멘트, 중력에 의한 flipping moment와 탄성력에 의한 restoring moment,를 비교하는 방법이 사용되었다. 여기서 시트의 물성치로 표현되는 무차원수 L/L_g 를 포함하여 시트의 종류에 관계없이 통용될 수 있는 flip 조건 예측 모델을 완성하였다. 결과적으로 실험 결과는 모델을 기반으로 flip 예측과 일치한다. 실험 결과로 정리된 flip 및 no-flip 영역 그래프를 통해 책 넘기는 동작을 최적화 할 수 있었고, 책 넘기기의 간략한 해석을 제시하였다. 이러한 결과를 통해, 종이나 원단 같이 유연한 시트를 다루는 산업에서 최적화된 경로를 적용하여 공정을 효율화 할 수 있을 것으로 기대된다.

부록

A.1 Measuring material properties

3.1장에서 Euler Elastica를 토대로 한 statics model을 완성하였고, 이를 통해 판 형태 탄성체의 재료 물성치를 측정할 수 있다. Cantilever 형태로 고정된 탄성 시트의 고정 각도와 길이, 두께를 알 때 Young's modulus와 Poisson ratio를 알 수 있다. 두 값을 변수로 static model에 shooting method를 이용하여 동일 조건의 실험 사진과 가장 유사한 플랏이 나오는 변수 값을 찾는 방법이다.

Fig. A.1은 PET의 물성치를 측정하기 위해 다른 시트 길이와 고정 각도 하에서 statics model과 실험을 비교한 결과이다. Model에 4.0 GPa의 Young's modulus와 0.44의 Poisson ratio를 대입해 모양을 플랏하면 같은 조건의 실험 사진과 매우 유사함을 확인할 수 있다. 같은 방법으로, Fig. A.2는 PI의 물성치 측정의 결과이다. PI의 Young's modulus는 2.0 GPa이고 Poisson ratio는 0.4이다.

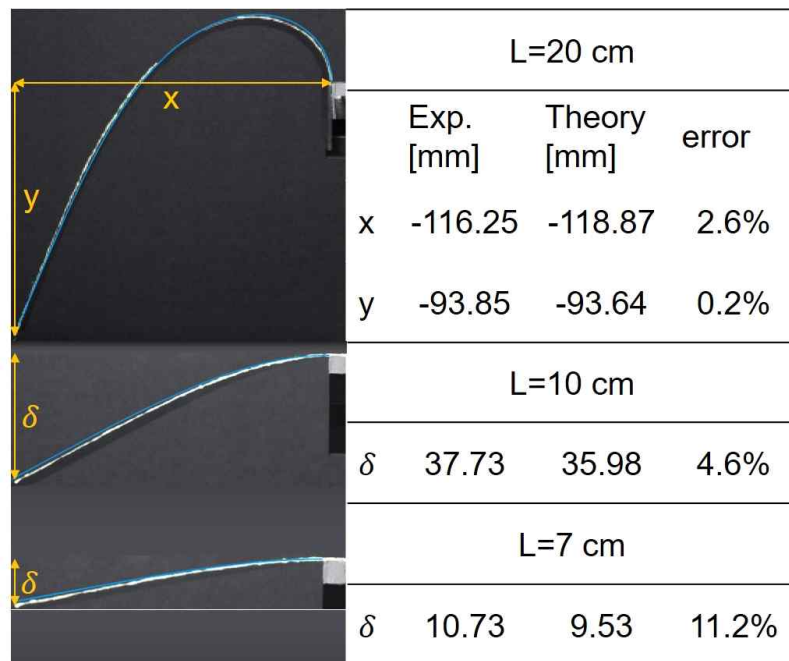


Fig. A.1 Measuring properties of PET. Blue solid line is a result of statics theory.

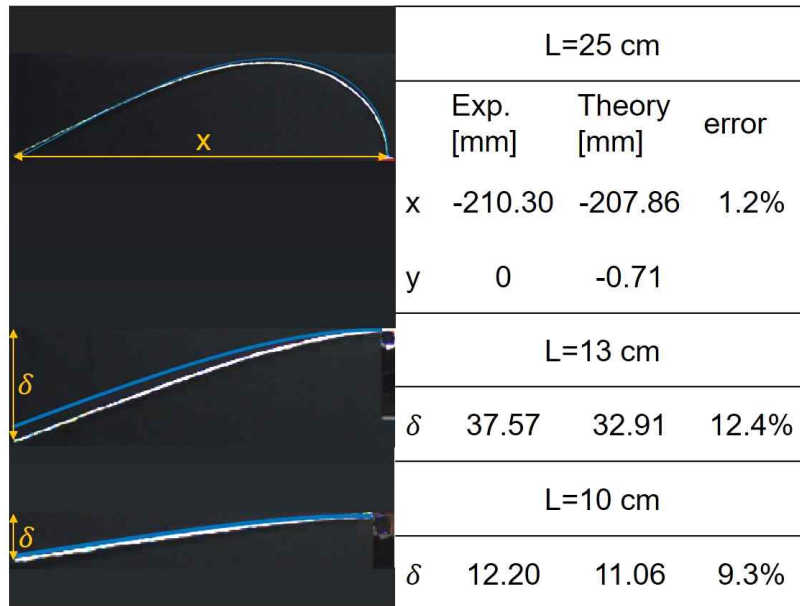


Fig. A.2 Measuring properties of PI. Blue solid line is a result of statics theory.

참고문헌

1. C. H. K. Williamson, and R. Govardhan, "Vortex-induced vibrations," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, 2004, pp. 413-455.
2. J. D. Holmes, *Wind loading of structures*, CRC press, 2018.
3. J. G. Beliveau, R. Vaicaitis, and M. Shinozuka, "Motion of suspension bridge subject to wind loads," *Journal of the Structural Division*, 103.ASCE 12982, 1977.
4. D. Tam, J. W. Bush, M. Robitaille, and A. Kudrolli, "Tumbling dynamics of passive flexible wings," *Physical review letters*, vol. 104(18), 2010, p. 184504.
5. W. Huang, et al., "Experimental study of a freely falling plate with an inhomogeneous mass distribution," *Physical Review E*, vol. 88, 2013, p. 053008.
6. G. I. Tayler, "Analysis of the swimming of long and narrow animals," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 214(1117), 1952, pp. 158-183.
7. M. J. Lighthill, "Note on the swimming of slender fish," *Journal of*

fluid Mechanics, vol. 9(2), 1960, pp. 305–317.

8. W. Kim, I. Lee, and H. Choi, “A weak-coupling immersed boundary method for fluid - structure interaction with low density ratio of solid to fluid,” *Journal of Computational Physics*, vol. 359, 2018, pp.296–311.

9. P. Buchak, C. Eloy, and P. M. Reis, “The clapping book: wind-driven oscillations in a stack of elastic sheets,” *Physical review letters*, vol. 105(19), 2010, p. 194301.

10. T. J. Pedley, “Scale effects in animal locomotion,” *International Symposium on Scale Effects in Animal Locomotion (1975: Cambridge University)*, Academic Press, 1977.

11. F. Fish, and G. V. Lauder, “Passive and active flow control by swimming fishes and mammals,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 38, 2006, pp. 193–224.

12. M. Gazzola, M. Argentina, and L. Mahadevan, “Scaling macroscopic aquatic locomotion,” *Nature Physics*, vol. 10(10), 2014, p. 758.

13. K. Drescher, et al., “Dancing Volvox: hydrodynamic bound states of swimming algae,” *Physical Review Letters*, vol. 102(16), 2009, p. 168101.

14. M. Abkarian, et al., “A novel mechanism for egress of malarial

parasites from red blood cells,” *Blood*, vol. 117(15), 2011, pp. 4118–4124.

15. L. D. Landau, and E. M. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, Pergamon Press, 1959.

Abstract

Elastohydrodynamics of turning a page

Jihye Myeong

Department of Mechanical and Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

A mundane activity of turning a page arises not only in reading, but also in product production with paper or textile. Here we analyze the shape and stability of a thin paper, bound to a book in one side and compressed from the other side, to gain mechanical understanding of the page turning. Page turning can be divided into a static phase and a dynamic phase. We start with describing the static shape of a sheet that is buckled between the bound end and gripping fingers, using the Euler Elastica. After releasing one end clamped with fingers, the buckled sheet restores the deformation receiving drag and gravity, and it makes vibrating motion to the left and right. Then, the central axis of the vibrating motion is biased to the left or right, and two flipping phenomena are observed, in which the sheet moves to one side. In this study, we proposed a method of predicting the final direction of the sheet after external load is removed by comparing the magnitudes of the moments acting on the fixed end in the static phase. We have

confirmed our predictions by experiments using elastic sheets of various geometries and materials. By explaining the existence of a boundary that determines the flipping way of a page, we describe the shortest path for turning a page. This study can contribute to suggest an optimal path for both readers and efficient manufacturing robots.

Keywords: Elastica, Fluid-structure interaction

Student number: 2017-21022